

(12) МЕЖДУНАРОДНАЯ ЗАЯВКА, ОПУБЛИКОВАННАЯ В СООТВЕТСТВИИ С
ДОГОВОРом О ПАТЕНТНОЙ КООПЕРАЦИИ (РСТ)

(19) ВСЕМИРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
Международное бюро



(43) Дата международной публикации:
18 Декабря 2003 (18.12.2003)

(10) Номер международной публикации:
WO 03/104845 A1

(51) Международная патентная классификация²:
G01B 9/02, G02B 26/08, A61B 6/00

(21) Номер международной заявки: PCT/RU03/00252

(22) Дата международной подачи:
4 июня 2003 (04.06.2003)

(25) Язык подачи: русский

(26) Язык публикации: русский

(30) Данные о приоритете:
2002114935 7 июня 2002 (07.06.2002) RU

(71) Заявители и

(72) Изобретатели: ГЕЛИКОНОВ Григорий Валенти-
нович [RU/RU]: 603136 Нижний Новгород, ул.
Героя Быкова, д. 3, кв. 19 (RU) [GELIKONOV,
Grigory Valentinovich, Nizhny Novgorod (RU)].
ГЕЛИКОНОВ Валентин Михайлович [RU/RU]:
603136 Нижний Новгород, ул. Героя Быкова, д. 3,
кв. 19 (RU) [GELIKONOV, Valentin Mikhailovich,
Nizhny Novgorod (RU)]. МЯКОВ Алексей Викто-
рович [RU/RU]: 603089 Нижний Новгород, ул.
Агрономическая, д. 8 (RU) [MYAKOV, Alexsey

Victorovich, Nizhny Novgorod (RU)]. ФЕЛЬД-
ШТЕЙН Феликс Исаакович [RU/RU]: 6624
Aintree Park Drive, apt. 203, Cleveland Ohio, 44143
(US) [FELDSCHTEIN, Felix Isaakovich, Moscow
(US)].

(74) Агент: ЛУГИНА Берта Давидовна; 603093 Ниж-
ний Новгород, ул. Ульянова, д. 46 (RU) [LUGI-
NA, Berta Davidovna, Nizhny Novgorod (RU)].

(81) Указанные государства (национально): CA, JP, US.

(84) Указанные государства (регионально): европей-
ский патент (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK,
EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL,
PT, RO, SE, SI, SK, TR).

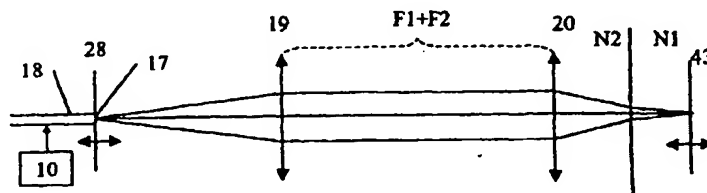
Опубликована

С отчётом о международном поиске.

В отношении двухбуквенных кодов, кодов языков и дру-
гих сокращений см. «Пояснения к кодам и сокращениям»,
публикуемые в начале каждого очередного выпуска Бюл-
летеня РСТ.

(54) Title: METHOD FOR OBTAINING THE IMAGE OF AN OBJECT, DEVICE FOR CARRYING OUT SAID METHOD
AND DEVICE FOR DELIVERING LOW COHERENT OPTICAL RADIATION

(54) Название изобретения: СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТА, УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕГО
ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ И УСТРОЙСТВО ДОСТАВКИ НИЗКОКОГЕРЕНТНОГО ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ



(57) Abstract: The invention relates to the study of the internal structure of objects with the aid of optical means. The inventive optical system for a device for delivering low coherent optical radiation is embodied in the form of at least two lens components (19, 20) which are arranged approximately confocally and have a positive optical power, thereby ensuring the constancy of the travel time of the radiation from a set point on a surface (28) of a transverse scanning to a corresponding conjugate point on an image plane. The structure of the system also ensures the correction of the aberration of the optical path of the radiation which is directed towards a studied object, said aberration being associated with a transverse scanning irrespective the surface (28) thereof is flat or curved. In another embodiment of the system, wherein the components (19, 20) are arranged confocally, the longitudinal scanning is carried out by modifying the optical path of the radiation from the surface (28) to the optical system, i.e. from the end surface (17) of the distal section of an optical fibre to the optical system. For this purpose, a device (10) for longitudinal scanning is arranged inside an optofibre probe, thereby making it possible to offset accordingly the radiation focusing point during the longitudinal scanning of the studied object, i.e. make it possible to superpose the position of the radiation focusing point with the position of a coherence window, and therefore simultaneously displace them.

[Продолжение на след. странице]

(57) Реферат: Изобретение относится к исследованиям внутренней структуры объектов оптическими средствами.

Оптическая система устройства доставки низкокогерентного оптического излучения выполнена в виде по меньшей мере двух размещенных приблизительно конфокально линзовых компонент (19), (20) с положительной оптической силой. Это обеспечивает постоянство времени распространения излучения от заданной точки на поверхности (28) поперечного сканирования до соответствующей сопряженной точки в плоскости изображения. За счет этого обеспечивается коррекция связанной с поперечным сканированием аберрации оптической длины пути излучения, направляемого на исследуемый объект, как при плоской поверхности (28) поперечного сканирования, так и при поверхности поперечного сканирования, имеющей кривизну. В другой модификации наряду с конфокальным размещением компонент (19), (20), продольное сканирование реализовано путем изменения оптической длины пути для излучения от поверхности (28) до оптической системы, т. е. от торцевой поверхности (17) дистальной части (18) оптического волокна до оптической системы. Для этого устройство (10) продольного сканирования размещено внутри оптоволоконного зонда. Это обеспечивает соответствующее смещение места фокусировки излучения при продольном сканировании исследуемого объекта, т.е. позволяет совместить положение места фокусировки излучения и положение окна когерентности, и, следовательно, одновременное их перемещение.

СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТА, УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕГО
ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ И УСТРОЙСТВО ДОСТАВКИ НИЗКОКОГЕРЕНТНОГО
ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

5

Область техники

Изобретение относится к технической физике, в частности, к исследованиям
внутренней структуры объектов оптическими средствами, и может быть
использовано для получения изображения объекта с помощью оптического
низкокогерентного излучения при диагностике состояния отдельных органов и
10 систем человека *in vivo* или *in vitro*, а также в технической диагностике, например,
для контроля технологических процессов.

Предшествующий уровень техники

Устройства для получения изображения объекта с помощью оптического
низкокогерентного излучения достаточно хорошо известны (см., например,
15 устройства по пат. США №№ 5321501, 5383467, 5459570, 5582171, 6134003,
международная заявка № WO 00/16034 и др) и представляют собой оптически
связанные источник низкокогерентного оптического излучения, оптический
интерферометр, и фотоприемник, связанный с блоком обработки и индикации.
Интерферометр выполнен обычно в виде интерферометра Майкельсона (см.,
20 например, X.Clivaz et al. "High resolution reflectometry in biological tissues", Opt.Lett.
/Vol.17, No. 1/January 1, 1992; J.A.Izatt, J.G.Fujimoto et al, "Optical coherence
microscopy in scattering media", Opt.Lett./ Vol.19, No. 8/April 15, 1994, p.590-592), либо
интерферометра Маха-Цендера (см., например, J.A.Izatt, J.G.Fujimoto et al. "Micron-
resolution Biomedical Imaging with optical coherence tomography", Optics & Photonic
25 News, October 1993, Vol.4, No.10, p.14-19; пат. США № 5582171, международная
заявка № WO 00/16034). Вне зависимости от используемой конкретной схемы
оптического интерферометра он традиционно содержит один или два
светорасщепителя, а также измерительное и опорное плечи. Измерительное плечо,
как правило, снабжено измерительным зондом, чаще всего, оптоволоконным,
30 выполняющим функцию доставки низкокогерентного оптического излучения на
исследуемый объект, а на конце опорного плеча установлено референтное зеркало
(например, A.Sergeev et al, "In vivo optical coherence tomography of human skin

microstructure", Proc.SPIE, v.2328, 1994, p.144; X.J.Wang et al. Characterization of human scalp hairs by optical low coherence reflectometry. Opt. Lett./Vol.20, No.5, 1995, pp.524-526). Для обеспечения продольного сканирования исследуемого объекта референтное зеркало соединяют с элементом, обеспечивающим механическое перемещение референтного зеркала (пат. США №№ 5321501, 5459570), либо фиксируют местоположение референтного зеркала, а продольное сканирование осуществляют с помощью пьезоэлектрического сканирующего элемента (пат. РФ № 2100787, 1997 г.), либо с помощью дисперсионно-решеточной линии задержки (K.F.Kwong, D.Yankelevich et al. 400-Hz mechanical scanning optical delay line, Optics Letters, Vol.18, No.7, April 1, 1993). Иногда оптическую схему интерферометра полностью или частично реализуют с использованием оптических элементов с сосредоточенными параметрами (пат. США № 5383467), но чаще оптические интерферометры такого назначения выполняют оптоволоконными (пат. США №№ 5321501, 5459570, 5582171).

Достоинством устройств для получения изображения объекта с помощью оптического низкокогерентного излучения является возможность получения изображений мутных сред с высоким пространственным разрешением, а также возможность неинвазивной диагностики при проведении медицинских исследований и неразрушающего контроля при технической диагностике различного оборудования.

Известные усовершенствования устройств для получения изображения объекта с помощью оптического низкокогерентного излучения направлены, в частности, на повышение разрешающей способности устройства (например, ст. W. Drexler et al. "In vivo ultrahigh-resolution optical coherence tomography", Opt. Lett./Vol.24, No.17/September 1, 1999), на снижение инерционности продольного сканирования исследуемого объекта (пат. РФ № 2100787), на повышение эффективности использования мощности источника оптического излучения при обеспечении оптимального соотношения сигнал/шум (например, международная заявка № WO 00/16034, пат. РФ № 2169347, 2001 г.).

Измерительный зонд, входящий в состав измерительного плеча, выполняет функцию доставки низкокогерентного оптического излучения на исследуемый объект и выполнен, как правило, в виде оптоволоконного зонда, содержащим

оптическое волокно, размещенное с возможностью прохождения через него низкокогерентного оптического излучения от проксимального конца зонда к его дистальному концу, и оптическую систему, которая обеспечивает фокусировку низкокогерентного оптического излучения на исследуемом объекте и включает, по меньшей мере, один линзовый компонент с положительной оптической силой, а также систему поперечного сканирования низкокогерентного оптического излучения (например, по пат. США №№ 5321501, 5383467, 5459570, 5582171). Измерительный зонд включает, как правило, протяженный корпус, снабженный продольным сквозным отверстием, в котором в продольном направлении размещено оптическое
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
55
60
65
70
75
80
85
90
95
100
105
110
115
120
125
130
135
140
145
150
155
160
165
170
175
180
185
190
195
200
205
210
215
220
225
230
235
240
245
250
255
260
265
270
275
280
285
290
295
300
305
310
315
320
325
330
335
340
345
350
355
360
365
370
375
380
385
390
395
400
405
410
415
420
425
430
435
440
445
450
455
460
465
470
475
480
485
490
495
500
505
510
515
520
525
530
535
540
545
550
555
560
565
570
575
580
585
590
595
600
605
610
615
620
625
630
635
640
645
650
655
660
665
670
675
680
685
690
695
700
705
710
715
720
725
730
735
740
745
750
755
760
765
770
775
780
785
790
795
800
805
810
815
820
825
830
835
840
845
850
855
860
865
870
875
880
885
890
895
900
905
910
915
920
925
930
935
940
945
950
955
960
965
970
975
980
985
990
995

волокно. Система поперечного сканирования включает исполнительный механизм, который может быть выполнен в виде пьезоэлектрического элемента, шагового электродвигателя, электромагнитной системы или электростатической системы (пат. США №№ 5321501, 5383467).

Известные усовершенствования измерительных зондов, входящих в состав устройств для получения изображения объектов с помощью оптического низкокогерентного излучения, направлены, в частности, на обеспечение возможности получения изображения тонких сосудов (пат. США № 55821721), на оптимизацию конструкции зонда с точки зрения получения максимальной амплитуды отклонения пучка оптического излучения при ограниченных размерах корпуса оптоволоконного зонда (пат. РФ № 2148378, 2000 г.).

Известные устройства для получения изображения объекта с помощью низкокогерентного оптического излучения реализуют, в сущности, один и тот же способ получения изображения объекта, описанный, например, в пат. США №№ 5321501, 5383467, 5459570, 5582171, пат. РФ № 2148378. По этому способу низкокогерентное оптическое излучение направляют одновременно на исследуемый объект и по референтному оптическому пути. При этом упомянутое оптическое излучение направляют на исследуемый объект через оптическую систему, которая обеспечивает фокусировку низкокогерентного оптического излучения на исследуемом объекте, при одновременном поперечном сканировании упомянутого оптического излучения по поверхности, приблизительно ортогональной направлению распространения упомянутого оптического излучения. Затем смешивают оптическое излучение, вернувшееся от исследуемого объекта, и

оптическое излучение, прошедшее по референтному оптическому пути, и отображают интенсивность оптического излучения, вернувшегося от исследуемого объекта, используя для этого оптическое излучение, являющееся результатом указанного смещения. Кроме того, осуществляют продольное сканирование
5 исследуемого объекта, изменяя по заданному закону, по меньшей мере, на несколько десятков длин волн низкокогерентного оптического излучения, разность оптических длин путей для низкокогерентного оптического излучения, направляемого на исследуемый объект, и низкокогерентного оптического излучения, направляемого по референтному пути.

10 Устройство по пат. РФ № 2148378, реализующее описанный выше способ, содержит оптически связанные источник низкокогерентного оптического излучения, интерферометр, и, по меньшей мере, один фотоприемник, выход которого связан с блоком обработки и индикации. Интерферометр включает оптически связанные светорасщепитель, измерительное и референтное плечи, при этом измерительное
15 плечо снабжено устройством доставки низкокогерентного оптического излучения, выполненным в виде оптоволоконного зонда.

Упомянутое устройство доставки низкокогерентного оптического излучения в этом устройстве выполнено в виде оптоволоконного зонда. Оптоволоконный зонд в устройстве по пат. РФ № 2148378 содержит оптически связанные оптическое
20 волокно, размещенное с возможностью прохождения через него низкокогерентного оптического излучения от проксимального конца оптоволоконного зонда к его дистальному концу, и оптическую систему, которая обеспечивает фокусировку низкокогерентного оптического излучения на исследуемом объекте. Оптическая система включает, по меньшей мере, первый линзовый компонент с положительной
25 оптической силой, а также систему поперечного сканирования низкокогерентного оптического излучения. Оптическое волокно входит в состав упомянутой системы поперечного сканирования, которая выполнена с возможностью перемещения торцевой поверхности дистальной части оптического волокна по поверхности поперечного сканирования в направлении, приблизительно перпендикулярном оси
30 оптического волокна.

Недостатком известного способа, так же, как и устройства по пат. РФ № 2148378, реализующего способ, и оптоволоконного зонда, выполняющего

функцию доставки низкокогерентного оптического излучения на исследуемый объект и являющегося частью устройства по пат. РФ № 2148378, равно как и других известных технических решений, предназначенных для получения изображения объекта с помощью оптического низкокогерентного излучения, является то, что

5 получаемое изображение плоского объекта выглядит искривленным. Это искривление связано с особенностью построения изображения по интерференционному сигналу, являющемуся результатом смещения оптического излучения, вернувшегося от исследуемого объекта, и излучения, прошедшего по референтному пути. Известно, что указанный интерференционный сигнал возникает

10 при равенстве оптических длин путей для низкокогерентного оптического излучения, направляемого на исследуемый объект, и низкокогерентного оптического излучения, направляемого по референтному пути. Однако, время распространения низкокогерентного оптического излучения от точек на плоской поверхности поперечного сканирования, разнo удаленных от оптической оси устройства, до

15 соответствующих сопряженных точек в плоскости изображения, различно. Поэтому, в то время как оптическая длина пути низкокогерентного оптического излучения, распространяющегося по референтному пути, неизменна, оптическая длина пути низкокогерентного оптического излучения, направляемого на исследуемый объект, при поперечном сканировании не является константой, что приводит к искривлению

20 формируемого изображения. Это видно на фиг. 19, где приведен пример изображения, полученного известным путем, а также на фиг. 8, 9 и 10, иллюстрирующих построение изображения с помощью известных технических решений. Фиг. 8 иллюстрирует построение изображения известным способом в известных устройствах для плоской поверхности 28 поперечного сканирования в

25 случае, когда оптическая система 29 выполнена в виде одного линзового компонента 30 с положительной оптической силой. На чертеже показана также линия 31, соответствующая геометрическому месту точек, до которых оптическая длина пути низкокогерентного оптического излучения, направляемого на исследуемый объект 11, имеет одинаковую величину при распространении от

30 соответствующих сопряженных точек на плоской поверхности 28 поперечного сканирования, разнo удаленных от оптической оси устройства. Фиг. 9 и фиг. 10 иллюстрируют построение изображения известным способом в известных

устройствах для плоской поверхности 28 поперечного сканирования в случаях, когда оптическая система 29 выполнена в виде двух линзовых компонент 32, 33 с положительной оптической силой, и расположенных друг от друга на расстоянии, соответственно, большем и меньшем конфокального. На фиг. 9, 10 показаны также, соответственно, линии 34, 35, соответствующие геометрическому месту точек до которых оптическая длина пути низкокогерентного оптического излучения, направляемого на исследуемый объект 11, имеет одинаковую величину при распространении от соответствующих сопряженных точек на плоской поверхности 28 поперечного сканирования, разнo удаленных от оптической оси устройства. Из рисунков видно, что линии 31, 34, 35 имеют кривизну. Кроме того, в случае, когда поверхность поперечного сканирования имеет кривизну, например, когда оптическое волокно в оптоволоконном зонде выполняет функцию упругой консоли, возникает дополнительная абберация, которая также вносит вклад в искривление формируемого изображения. Другим недостатком известных технических решений является фиксированное положение места фокусировки направляемого на объект низкокогерентного оптического излучения, в то время как местоположение окна когерентности при продольном сканировании изменяется, что ограничивает поперечное разрешение способа и реализующих его устройств, особенно при значительной глубине сканирования. Причиной является сильная дифракционная расходямость остросфокусированного излучения, и, как следствие, малая глубина резкости. Так, глубина резкости для Гауссова сфокусированного пучка составляет $d = \pi a^2 / 4\lambda$, где a – диаметр перетяжки пучка, λ – длина волны, $\pi = 3.1416$. Соответственно, для типичных параметров $a = 0.005$ мм, $\lambda = 1300$ нм, глубина резкости составляет всего 0.015 мм (15 μ m). Для обеспечения высокого поперечного разрешения при большой глубине продольного сканирования в известных устройствах производят синхронное сканирование положения фокальной перетяжки, т.е. места фокусировки оптического излучения, путем перемещения одной из линз оптической системы, и положения окна когерентности путем сканирования разности длин плеч интерферометра. Такой подход был впервые продемонстрирован в ст. Izatt, JA, Hee, MR, Owen, GM, Swanson, EA and Fujimoto, JG, 1994, Optical coherence microscopy in scattering media, Optics Letts. 19, 590-592, и получил название

оптической когерентной микроскопии (ОКМ). Все известные реализации ОКМ выполняются путем выполнения этих двух сканирований (положения места фокусировки и положения окна когерентности) с помощью двух независимых синхронно работающих устройств. Синхронизация этих устройств является самостоятельной и довольно сложной инженерной задачей, и сложности нарастают по мере увеличения скорости ввода изображений.

Раскрытие изобретения

Предлагаемое изобретение направлено на разработку способа получения изображения объекта с помощью оптического низкокогерентного излучения и устройства для его осуществления, а также устройства доставки низкокогерентного оптического излучения, являющегося частью устройства для получения изображения объекта, которые позволяют формировать неискаженное, плоское изображение плоского объекта исследования, а также на повышение поперечного разрешения способа получения изображения объекта, реализующего его устройства и устройства доставки низкокогерентного оптического излучения.

Разработанный способ получения изображения объекта заключается в том, что так же, как и в способе, известному по пат. РФ № 2148378, низкокогерентное оптическое излучение направляют одновременно на исследуемый объект и по референтному пути. При этом упомянутое оптическое излучение направляют на исследуемый объект через оптическую систему, которая обеспечивает фокусировку низкокогерентного оптического излучения на исследуемом объекте, при одновременном поперечном сканировании упомянутого оптического излучения по поверхности, приблизительно ортогональной направлению распространения упомянутого оптического излучения. Затем смешивают излучение, вернувшееся от исследуемого объекта, и излучение, прошедшее по референтному оптическому пути, и отображают интенсивность оптического излучения, вернувшегося от исследуемого объекта, используя для этого оптическое излучение, являющееся результатом указанного смешения.

В отличие от известного способа, согласно изобретению корректируют связанную с поперечным сканированием абберацию оптической длины пути низкокогерентного оптического излучения, направляемого на исследуемый объект, путем обеспечения постоянства времени распространения низкокогерентного

оптического излучения от заданной точки на поверхности поперечного сканирования до соответствующей сопряженной точки в плоскости изображения в пределах поля зрения.

Целесообразно для заданных координат на поверхности поперечного сканирования дополнительно осуществлять продольное сканирование, изменяя по заданному закону разность оптических длин путей для низкокогерентного оптического излучения, направляемого на исследуемый объект, и низкокогерентного оптического излучения, направляемого по референтному пути.

В частном случае разность оптических длин путей для низкокогерентного оптического излучения, направляемого на исследуемый объект, и низкокогерентного оптического излучения, направляемого по референтному пути, изменяют, по меньшей мере, на несколько десятков длин волн низкокогерентного оптического излучения.

В другом частном случае изменение разности оптических длин путей для низкокогерентного оптического излучения, направляемого на исследуемый объект, и низкокогерентного оптического излучения, направляемого по референтному пути, осуществляют путем изменения оптической длины пути для низкокогерентного оптического излучения от поверхности поперечного сканирования до оптической системы.

В другом частном случае исследуемым объектом является биоткань живого организма.

В конкретной реализации этого частного случая исследуемым объектом является внутренняя полость живого организма.

В конкретной реализации в качестве упомянутого низкокогерентного оптического излучения используют оптическое излучение видимого или ближнего ИК диапазона длин волн.

Разработанное устройство для получения изображения объекта, так же, как и устройство, известное по пат. РФ № 2148378, содержит оптически связанные источник низкокогерентного оптического излучения, интерферометр, и, по меньшей мере, один фотоприемник, выход которого связан с блоком обработки и индикации. Интерферометр включает оптически связанные светорасщепитель, измерительное и референтное плечи, а измерительное плечо снабжено устройством доставки

низкокогерентного оптического излучения. Устройство доставки содержит оптически связанные оптическое волокно и оптическую систему, а также систему поперечного сканирования низкокогерентного оптического излучения. Оптическое волокно размещено с возможностью прохождения через него низкокогерентного оптического излучения от проксимального конца устройства доставки к его дистальному концу, а оптическая система обеспечивает фокусировку низкокогерентного оптического излучения на исследуемом объекте. Оптическая система включает, по меньшей мере, первый линзовый компонент с положительной оптической силой, а оптическое волокно входит в состав упомянутой системы поперечного сканирования, которая выполнена с возможностью перемещения торцевой поверхности дистальной части оптического волокна по поверхности поперечного сканирования в направлении, приблизительно перпендикулярном оси оптического волокна.

В отличие от известного устройства, согласно изобретению оптическая система оптоволоконного зонда выполнена с возможностью коррекции аберрации оптической длины измерительного плеча, связанной с поперечным сканированием. При этом упомянутая оптическая система содержит, по меньшей мере, второй линзовый компонент с положительной оптической силой, установленный за упомянутым первым линзовым компонентом.

В частном случае поверхность поперечного сканирования характеризуется отличной от нуля кривизной.

В конкретной реализации этого частного случая упомянутое оптическое волокно выполняет функцию упругой консоли и закреплено в опорном элементе, входящем в состав оптоволоконного зонда.

В другом частном случае первый и второй линзовые компоненты оптической системы размещены приблизительно конфокально.

В другом частном случае первый линзовый компонент оптической системы размещен на расстоянии, приблизительно равном фокусному расстоянию этого линзового компонента, от поверхности поперечного сканирования, а расстояние между первым и вторым линзовыми компонентами оптической системы отличается от расстояния, соответствующего конфокальному расположению упомянутых

линзовых компонент оптической системы на величину $\delta 1$, связанную с фокусным расстоянием $F1$ первого линзового компонента оптической системы и радиусом R кривизны поверхности поперечного сканирования соотношением:

$$\delta 1 \cong (F1)^2 / R.$$

5 В другом частном случае первый линзовый компонент оптической системы смещен на расстояние $\delta 2$ от положения, при котором расстояние от этого линзового компонента до поверхности поперечного сканирования приблизительно равно фокусному расстоянию $F1$ этого линзового компонента, а расстояние между первым и вторым линзовыми компонентами оптической системы отличается от расстояния,
10 соответствующего конфокальному расположению упомянутых линзовых компонент оптической системы на величину $\delta 3$, определяемую соотношением:

$$\delta 3 \cong (F1)^2 / (R + \delta 2).$$

В другом частном случае устройство доставки низкокогерентного оптического излучения выполнено в виде оптоволоконного зонда.

15 В другом частном случае, по меньшей мере, одно из плеч интерферометра дополнительно снабжено устройством для продольного сканирования исследуемого объекта.

В конкретной реализации этого частного случая устройство для продольного сканирования размещено в измерительном плече интерферометра и выполнено
20 обеспечивающим изменение оптической длины участка измерительного плеча от поверхности поперечного сканирования до оптической системы.

В частном случае этой конкретной реализации при получении изображения подповерхностной части исследуемого объекта коэффициент M увеличения оптической системы связан с показателем $N1$ преломления исследуемого объекта
25 следующим образом: $M = 1 / N1$.

В частном другом случае этой конкретной реализации при получении изображения профиля исследуемого объекта коэффициент M увеличения оптической системы связан с показателем $N2$ преломления среды, соприкасающейся с поверхностью исследуемого объекта, следующим образом: $M = 1 / N2$.

30 В другой конкретной реализации устройство для продольного сканирования размещено внутри устройства доставки низкокогерентного оптического излучения.

В другом частном случае торцевая поверхность оптического волокна снабжена жестко скрепленной с ним микролинзой.

Разработанное устройство доставки низкокогерентного оптического излучения является то, что он так же, как и устройство доставки, известное по пат.
5 РФ № 2148378, содержит оптически связанные оптическое волокно, размещенное с возможностью прохождения через него низкокогерентного оптического излучения от проксимального конца устройства доставки к его дистальному концу, и оптическую систему, которая обеспечивает фокусировку низкокогерентного оптического излучения на исследуемом объекте. Оптическая система включает, по
10 меньшей мере, первый линзовый компонент с положительной оптической силой, а также систему поперечного сканирования низкокогерентного оптического излучения. Оптическое волокно входит в состав упомянутой системы поперечного сканирования, которая выполнена с возможностью перемещения торцевой поверхности дистальной части оптического волокна по поверхности поперечного
15 сканирования в направлении, приблизительно перпендикулярном оси оптического волокна.

В отличие от известного устройства доставки низкокогерентного оптического излучения, согласно изобретению упомянутая оптическая система выполнена с возможностью коррекции связанной с поперечным сканированием аберрации
20 оптической длины пути низкокогерентного оптического излучения, проходящего через устройство доставки. При этом оптическая система содержит, по меньшей мере, второй линзовый компонент с положительной оптической силой, который установлен за упомянутым первым линзовым компонентом.

В частном случае поверхность поперечного сканирования характеризуется
25 отличной от нуля кривизной.

В конкретной реализации этого частного случая упомянутое оптическое волокно выполняет функцию упругой консоли и закреплено в опорном элементе, входящем в состав устройства доставки низкокогерентного оптического излучения.

В другом частном случае первый и второй линзовые компоненты оптической
30 системы размещены приблизительно конфокально.

В другом частном случае первый линзовый компонент оптической системы размещен на расстоянии, приблизительно равном фокусному расстоянию этого

линзового компонента, от поверхности поперечного сканирования, а расстояние между первым и вторым линзовыми компонентами оптической системы отличается от расстояния, соответствующего конфокальному расположению упомянутых линзовых компонент оптической системы на величину $\delta 1$, связанную с фокусным расстоянием $F1$ первого линзового компонента оптической системы и радиусом R кривизны поверхности поперечного сканирования соотношением:

$$\delta 1 \cong (F1)^2 / R.$$

В другом частном случае первый линзовый компонент оптической системы смещен на расстояние $\delta 2$ от положения, при котором расстояние от этого линзового компонента до поверхности поперечного сканирования приблизительно равно фокусному расстоянию $F1$ этого линзового компонента, а расстояние между первым и вторым линзовыми компонентами оптической системы отличается от расстояния, соответствующего конфокальному расположению упомянутых линзовых компонент оптической системы на величину $\delta 3$, определяемую соотношением:

$$\delta 3 \cong (F1)^2 / (R + \delta 2).$$

В другом частном случае что устройство доставки низкокогерентного оптического излучения выполнено в виде оптоволоконного зонда, при этом оптическое волокно, оптическая система и система поперечного сканирования низкокогерентного оптического излучения размещены в протяженном корпусе, снабженном продольным, сквозным отверстием, в котором в продольном направлении размещено упомянутое оптическое волокно.

В другом частном случае вблизи плоскости изображения торцевой поверхности дистальной части оптического волокна размещено выходное окно устройства доставки низкокогерентного оптического излучения.

В конкретной реализации этого частного случая функцию выходного окна устройства доставки низкокогерентного оптического излучения выполняет второй линзовый компонент оптической системы.

В другой конкретной реализации этого частного случая нормаль к наружной поверхности выходного окна устройства доставки низкокогерентного оптического излучения ориентирована под углом к направлению падения низкокогерентного оптического излучения на упомянутую наружную поверхность, превышающим угол

расходимости упомянутого низкокогерентного оптического излучения в месте его пересечения с упомянутой наружной поверхностью.

В частном случае при однокоординатной приближенно линейной траектории поперечного сканирования второй линзовый компонент смещен в направлении, ортогональном направлению поперечного сканирования, и в направлении, ортогональном направлению распространения низкокогерентного оптического излучения.

В другом частном случае устройство доставки дополнительно снабжено устройством для продольного сканирования, выполненным в виде устройства для изменения оптической длины пути низкокогерентного оптического излучения от поверхности поперечного сканирования до оптической системы.

В конкретной реализации этого частного случая при получении изображения подповерхностной части исследуемого объекта коэффициент M увеличения оптической системы связан с показателем N_1 преломления исследуемого объекта следующим образом: $M = 1/N_1$.

В другой конкретной реализации этого частного случая при получении изображения профиля исследуемого объекта коэффициент M увеличения оптической системы связан с показателем N_2 преломления среды, соприкасающейся с поверхностью исследуемого объекта, следующим образом: $M = 1/N_2$.

В другом частном случае торцевая поверхность оптического волокна снабжена жестко скрепленной с ним микролинзой.

В настоящем изобретении при получении изображения объекта обеспечено постоянство времени распространения низкокогерентного оптического излучения от заданной точки на поверхности поперечного сканирования, т.е. от торцевой поверхности дистальной части оптического волокна, которая совмещена с поверхностью поперечного сканирования, до соответствующей сопряженной точки в плоскости изображения в пределах поля зрения, что обеспечивает коррекцию связанной с поперечным сканированием аберрации оптической длины пути низкокогерентного оптического излучения, направляемого на исследуемый объект. Это достигается выполнением оптической системы в виде, по меньшей мере, двух, размещенных приблизительно конфокально, линзовых компонент с положительной оптической силой. При этом, как при плоской поверхности поперечного

сканирования, так и при поверхности поперечного сканирования, имеющей кривизну, первый линзовый компонент может быть установлен как на расстоянии, равном фокусному расстоянию этого компонента, от поверхности поперечного сканирования, так и на расстоянии, несколько большем или несколько меньшем 5 указанного фокусного расстояния. В случае, когда поверхность поперечного сканирования имеет кривизну, компенсация связанной с ней дополнительной aberrации, обеспечивается соответствующей вносимой aberrацией с обратным знаком. Кроме того, реализация продольного сканирования путем изменения оптической длины пути для низкокогерентного оптического излучения от 10 поверхности поперечного сканирования до оптической системы, а, следовательно, и до исследуемого объекта, обеспечивает соответствующее смещение места фокусировки низкокогерентного оптического излучения при продольном сканировании исследуемого объекта. Совместная реализация в настоящем изобретении постоянства времени распространения низкокогерентного оптического 15 излучения от заданной точки на поверхности поперечного сканирования, т.е. от торцевой поверхности дистальной части оптического волокна, до соответствующей сопряженной точки в плоскости изображения и указанного способа продольного сканирования позволяют совместить положение места фокусировки низкокогерентного оптического излучения и положение окна когерентности, и, 20 следовательно, одновременное их перемещение. Это исключает необходимость использования дополнительных синхронизирующих устройств, требующихся в известных технических решениях. Указанная реализация обеспечивает высокое поперечное разрешение способа и устройства для его реализации. Ориентирование нормали к наружной поверхности выходного окна оптоволоконного зонда под углом 25 к направлению падения низкокогерентного оптического излучения на упомянутую наружную поверхность, превышающим угол расходимости низкокогерентного оптического излучения в месте его пересечения с упомянутой наружной поверхностью, препятствует попаданию отраженного излучения назад в оптическое волокно. Конкретные виды и формы выполнения второго линзового компонента 30 характеризуют изобретение в частных конкретных случаях его выполнения.

Таким образом, предложенные способ для получения изображения объекта, устройство для его реализации и устройство доставки низкокогерентного

оптического излучения, являющееся частью устройства для получения изображения объекта, позволяют формировать неискаженное, плоское изображение плоского объекта исследования, и характеризуются также высоким поперечным разрешением.

Краткое описание чертежей

5 Сущность настоящего изобретения подробно раскрывается в приведенном ниже описании вариантов осуществления изобретения и иллюстрируется прилагаемыми чертежами, где:

Фиг. 1 - вариант структурной схемы разработанного устройства для получения изображения объекта, с помощью которого может быть реализован
10 разработанный способ.

Фиг. 2 - вариант конструкции оптоволоконного зонда (в поперечном сечении).

Фиг. 3 - один из вариантов выполнения оптической системы оптоволоконного зонда (в поперечном сечении).

15 Фиг. 4 - другой вариант выполнения оптической системы оптоволоконного зонда (в поперечном сечении).

Фиг. 5 - другой вариант выполнения оптической системы оптоволоконного зонда (в поперечном сечении).

20 Фиг. 6 - другой вариант выполнения оптической системы оптоволоконного зонда (в поперечном сечении).

Фиг. 7 - другой вариант выполнения оптической системы оптоволоконного зонда (в поперечном сечении).

Фиг. 8 иллюстрирует построение изображения с помощью известного технического решения.

25 Фиг. 9 иллюстрирует построение изображения с помощью другого известного технического решения.

Фиг. 10 иллюстрирует построение изображения с помощью другого известного технического решения.

30 Фиг. 11 иллюстрирует процедуру коррекции аберрации оптической длины пути низкокогерентного оптического излучения, направляемого на исследуемый объект, с помощью одной из модификаций разработанных технических решений при плоской поверхности поперечного сканирования.

Фиг. 12 иллюстрирует процедуру коррекции аберрации оптической длины пути низкокогерентного оптического излучения, направляемого на исследуемый объект, с помощью другой модификации разработанных технических решений при плоской поверхности поперечного сканирования.

5 Фиг. 13 иллюстрирует процедуру коррекции аберрации оптической длины пути низкокогерентного оптического излучения, направляемого на исследуемый объект, с помощью другой модификации разработанных технических решений при плоской поверхности поперечного сканирования.

10 Фиг. 14 иллюстрирует процедуру коррекции аберрации оптической длины пути низкокогерентного оптического излучения, направляемого на исследуемый объект, с помощью другой модификации разработанных технических решений при поверхности поперечного сканирования, имеющей кривизну.

15 Фиг. 15 иллюстрируют процедуру коррекции аберрации оптической длины пути низкокогерентного оптического излучения, направляемого на исследуемый объект, с помощью другой модификации разработанных технических решений при поверхности поперечного сканирования, имеющей кривизну.

На фиг. 16 приведен другой вариант структурной схемы разработанного устройства для получения изображения объекта, с помощью которого может быть реализован разработанный способ.

20 Фиг. 17 иллюстрирует один из вариантов выполнения оптоволоконного зонда при размещении в нем устройства для сканирования вглубь исследуемого объекта, выполненным в виде устройства для изменения оптической длины пути низкокогерентного оптического излучения от торцевой поверхности оптического волокна до оптической системы.

25 Фиг. 18 иллюстрирует другой вариант выполнения оптоволоконного зонда при размещении в нем устройства для сканирования вглубь исследуемого объекта, выполненным в виде устройства для изменения оптической длины пути низкокогерентного оптического излучения от торцевой поверхности оптического волокна до оптической системы.

30 На фиг. 19 показан пример изображения, полученного с помощью известного технического решения.

На фиг. 20 показан пример изображения, полученного с помощью

разработанного технического решения.

Варианты осуществления изобретения.

Разработанный способ получения изображения объекта, устройство для его реализации и устройство доставки низкокогерентного оптического излучения иллюстрируются на примерах оптоволоконного интерферометра, входящего в состав устройства для оптической низкокогерентной томографии, и оптоволоконного зонда, хотя очевидно, что они могут быть реализованы с помощью оптических элементов с сосредоточенными параметрами.

Работа разработанных устройства для получения изображения объекта и устройства доставки низкокогерентного оптического излучения, выполненного в конкретной реализации в виде оптоволоконного зонда, будет понятна из приведенного ниже описания реализации способа получения изображения объекта.

Способ получения изображения объекта с помощью устройства, структурная схема которого приведена на фиг. 1, и с помощью оптоволоконного зонда, изображенного на фиг. 2, варианты оптической системы которого приведены на фиг. 3, фиг. 4, фиг. 5, фиг. 6 и фиг. 7, реализуется следующим образом.

Размещают оптоволоконный зонд 8 (фиг. 2), содержащий протяженный корпус 12, так, что обеспечивается фокусировка низкокогерентного оптического излучения на исследуемом объекте 11. При этом оптоволоконный зонд 8 может быть выполнен миниатюрным (см. фиг. 2) и размещен в дистальном конце инструментального канала эндоскопа (на чертеже не показано). В конкретной реализации, предназначенной для эндоскопических исследований, длина корпуса 12 не превышает 27 мм, а его диаметр не превышает 2,7 мм. Для удобства пользования дистальная часть оптоволоконного зонда 8 может быть выполнена в виде сменных наконечников.

Корпус 12, который может быть выполнен из нержавеющей стали, снабжен продольным, сквозным отверстием 13, в котором в продольном направлении размещены оптическое волокно 14, оптическая система 15 и система 16 поперечного сканирования, связанная с источником управляющего тока (на чертеже не показан). В качестве оптического волокна 14 целесообразно использовать одномодовое поляризационно-сохраняющее волокно; например, может быть использовано оптическое волокно типа PANDA. Торцевая поверхность 17 дистальной части 18

оптического волокна 14 оптически связана с оптической системой 15.

Оптическая система 15, которая содержит, по меньшей мере, два линзовых компонента с положительной оптической силой, обеспечивает фокусировку низкокогерентного оптического излучения на исследуемом объекте 11. В конкретной реализации по фиг. 2 оптическая система 15 включает последовательно установленные на оптической оси первый линзовый компонент 19 и второй линзовый компонент 20. В варианте оптоволоконного зонда, представленном на фиг. 2, вблизи плоскости 22 изображения торцевой поверхности 17 дистальной части 18 оптического волокна 14 размещено выходное окно 23 оптоволоконного зонда 8. При этом функцию выходного окна 23 оптоволоконного зонда 8 выполняет второй линзовый компонент 20 оптической системы 15.

Оптическая система 15 оптоволоконного зонда 8 может не содержать выходного окна; такой вариант выполнения оптической системы 15 представлен на фиг. 3.

Оптическая система 15 может быть выполнена так, как это показано на фиг. 4. Здесь нормаль 24 к наружной поверхности 25 выходного окна 23 оптоволоконного зонда 8 ориентирована под углом α_1 к направлению падения низкокогерентного оптического излучения на наружную поверхность 25, превышающим угол α_2 расходимости упомянутого низкокогерентного оптического излучения в месте его пересечения с наружной поверхностью 25. В этом варианте второй линзовый компонент 20 смещен в направлении, ортогональном направлению поперечного сканирования, и в направлении, ортогональном направлению распространения низкокогерентного оптического излучения. В этой конкретной реализации второй линзовый компонент 20 выполнен в виде сферической линзы, поэтому указанное смещение реализовано смещением центра кривизны линзы.

Фиг. 5 иллюстрирует другой вариант указанного смещения второго линзового компонента 20. При этом также выполняется указанное выше условие ориентации нормали 24 к направлению падения низкокогерентного оптического излучения на наружную поверхность 25 выходного окна 23. В этой реализации выходное окно 23 выполнено в виде плоскопараллельной пластины 26.

В реализации оптической системы 15, показанной на фиг. 6, второй линзовый

компонент 20 выполняет функцию выходного окна 23. При этом наружная поверхность 25 линзового компонента 20 скошена для выполнения указанного выше условия, касающегося ориентации нормали 24 к направлению падения низкокогерентного оптического излучения на наружную поверхность 25 выходного
5 окна 23.

Оптическая система 15 может быть выполнена в виде композитной линзы 27, (фиг. 7), в состав которой входят первый 19 и второй 20 линзовые компоненты.

Как первый 19, так и второй 20 линзовые компоненты могут быть выполнены в виде градиентной линзы. Оптическая система 15 оптоволоконного зонда 8 также
10 может быть выполнена в виде градиентной линзы, в состав которой входят первый 19 и второй 20 линзовые компоненты (на чертеже не показано). Как первый 19, так и второй 20 линзовые компоненты в различных, конкретных реализациях оптической системы 15, могут быть выполнены в виде композитной линзы. Эти варианты не представлены на чертежах.

15 Первый 19 и второй 20 линзовые компоненты могут включать в себя различные оптические элементы, необходимые, например, для коррекции аберраций различной природы. Целесообразно для повышения качества получаемого изображения выполнить первый 19 и второй 20 линзовые компоненты асферическими.

20 Во всех вариантах реализации оптоволоконного зонда 8 расстояние между вторым линзовым компонентом 20 и плоскостью 22 изображения определяется условием обеспечения фокусировки на ней низкокогерентного оптического излучения, направляемого на исследуемый объект 11.

В конкретной реализации, когда оптоволоконный зонд 8 является
25 эндоскопическим, оптоволоконный зонд 8 размещают так, что наружная поверхность 25 выходного окна 23 находится в соприкосновении с исследуемым объектом 11. Исследуемым объектом 11 в конкретной реализации является биоткань живого организма, в частности, внутренняя полость живого организма.

Низкокогерентное оптическое излучение, в конкретной реализации,
30 видимого или ближнего ИК диапазона, сформированное с помощью источника 1, в качестве которого может быть использован, например, лазер или суперлюминесцентный диод, направляют одновременно на исследуемый объект 11 и

по референтному пути. Для этого низкокогерентное оптическое излучение разделяют на две части с помощью светорасщепителя 5, входящего в состав оптоволоконного интерферометра 2, оптически связанного с источником 1. В качестве интерферометра 2 может быть использован оптический интерферометр
5 любого типа, например, интерферометр Майкельсона, интерферометр Маха-Цендера, а также комбинации таких интерферометров, известные, в частности, по международной заявке № WO 00/16034. В конкретной реализации по фиг. 1 оптоволоконный интерферометр 2 выполнен в виде интерферометра Майкельсона. Часть оптического излучения с выхода светорасщепителя 5 с помощью
10 оптоволоконного измерительного плеча 6, оптически связанного со светорасщепителем 5, и с помощью устройства доставки низкокогерентного оптического излучения, выполненным в конкретной реализации в виде оптоволоконного зонда 8, которым снабжено измерительное плечо 6, направляют на исследуемый объект 11. При этом оптическое излучение проходит через отрезок
15 оптического волокна 14 от проксимального конца оптического волокна 14 к его дистальному концу 18 (фиг. 2).

Часть измерительного плеча 6 оптоволоконного интерферометра 2 может быть выполнена гибкой и введена в инструментальный канал эндоскопа (на чертеже не показано). Часть измерительного плеча 6 интерферометра 2, включающая часть,
20 вводимую в инструментальный канал эндоскопа, может быть выполнена сменной и соединена с основной частью измерительного плеча 6 с помощью разъемного соединения. При этом сменная часть измерительного плеча 6 интерферометра 2 может быть выполнена одноразовой.

При доставке оптического излучения на исследуемый объект 11
25 осуществляют поперечное сканирование этой части оптического излучения путем перемещения дистальной части 18 оптического волокна 14 в направлении приблизительно перпендикулярном оси оптического волокна 14 с помощью системы 16 поперечного сканирования (фиг. 2). Для этого система 16 выполнена с
возможностью перемещения дистальной части 18 оптического волокна 14 в
30 направлении, приблизительно перпендикулярном оси оптического волокна 14. В конкретной реализации, представленной на фиг. 2, оптическое волокно 14 выполняет функцию упругой консоли и закреплено в опорном элементе 21,

входящем в состав оптоволоконного зонда 8. Система 16 поперечного сканирования может быть реализована, например, так же, как в устройстве по пат. РФ № 2148378. При осуществлении поперечного сканирования корректируют связанную с поперечным сканированием абберацию оптической длины пути низкокогерентного оптического излучения, направляемого на исследуемый объект, путем обеспечения 5 постоянного времени распространения низкокогерентного оптического излучения от заданной точки на поверхности поперечного сканирования до соответствующей сопряженной точки в плоскости изображения в пределах поля зрения. Это достигается соответствующей геометрией оптической системы 15.

10 В частности, при плоской поверхности 28 поперечного сканирования, первый 19 и второй 20 линзовые компоненты оптической системы 15 размещены приблизительно конфокально (фиг. 11, фиг. 12 и фиг. 13). Фиг. 11 иллюстрирует случай, когда первый линзовый компонент 19 размещен на расстоянии, приблизительно равном фокусному расстоянию $F1$ этого компонента, от 15 поверхности 28, фиг. 12 иллюстрирует случай, когда первый линзовый компонент 19 размещен на расстоянии $d1$, несколько большем фокусного расстояния $F1$, от поверхности 28, а на фиг. 13 первый линзовый компонент 19 размещен на расстоянии $d2$, несколько меньшем фокусного расстояния $F1$, от поверхности 28. При поверхности 39 сканирования, имеющей кривизну (фиг. 14), первый линзовый 20 компонент 19 оптической системы 15 размещен на расстоянии, приблизительно равном фокусному расстоянию $F1$ этого линзового компонента, от поверхности 39 поперечного сканирования. В этом случае расстояние между первым 19 и вторым 20 линзовыми компонентами оптической системы 15 отличается от расстояния, соответствующего конфокальному расположению упомянутых линзовых 25 компонент 19, 20 оптической системы 15 на величину $\delta 1$, связанную с фокусным расстоянием $F1$ первого линзового компонента 19 и радиусом R кривизны поверхности 39 поперечного сканирования соотношением:

$$\delta 1 \cong (F1)^2 / R.$$

В другой модификации, при поверхности 39 сканирования, имеющей кривизну 30 (фиг. 15), первый линзовый компонент 19 оптической системы 15 смещен на расстояние $\delta 2$ от положения, при котором расстояние от линзового компонента 19 до

поверхности 39 поперечного сканирования приблизительно равно фокусному расстоянию F1 линзового компонента 19, а расстояние между первым и вторым линзовыми компонентами 19, 20 оптической системы 15 отличается от расстояния, соответствующего конфокальному расположению упомянутых линзовых компонент 19, 20 на величину $\delta 3$, определяемую соотношением:

$$\delta 3 \cong (F1)^2 / (R + \delta 2).$$

Другую часть низкокогерентного оптического излучения направляют по референтному оптическому пути с помощью референтного плеча 7, оптически связанного со светорасщепителем 5 оптоволоконного интерферометра 2. В конкретной реализации на конце референтного плеча 7 установлено на референтное зеркало 9. Референтное плечо 7 содержит устройство 10, предназначенное для изменения разности оптических длин плеч интерферометра 2 для осуществления продольного сканирования исследуемого объекта 11. Устройство 10 связано с источником управляющего напряжения (последний на чертеже не показан). В реализации устройства по фиг. 1 референтное зеркало 9 выполнено неподвижным, а устройство 10 выполнено по патенту РФ № 2100787 в виде оптоволоконного пьезоэлектрического преобразователя, содержащего по меньшей мере один пьезоэлектрический элемент, выполненный с возможностью формирования в нем электрического поля и характеризующийся высоким обратным пьезоэффектом, жестко скрепленные с пьезоэлектрическим элементом электроды, а также оптическое волокно, жестко скрепленное с электродами. Размер пьезоэлектрического элемента в направлении, приблизительно ортогональном вектору электрического поля существенно превышает размер пьезоэлектрического элемента в направлении, приблизительно совпадающем с вектором электрического поля, при этом длина оптического волокна существенно превышает диаметр пьезоэлектрического элемента.

Устройство 10 может быть выполнено аналогичным сканерам, описанным в пат. США № 5321501. В этом случае референтное зеркало 9 выполнено с возможностью перемещения с постоянной скоростью, а устройство 10, соединенное с референтным зеркалом 9, может быть выполнено в виде различного рода механизмов, описанных в указанном патенте, обеспечивающих необходимое

перемещение референтного зеркала 9. Устройство 10 может также быть выполнено по ст. K.F.Kwong, D.Yankelevich et al, 400-Hz mechanical scanning optical delay line, Optics Letters, Vol.18, No.7, April 1, 1993, в виде дисперсионно-решеточной линии задержки.

5 С помощью устройства 10 для заданных координат на поверхности 28 поперечного сканирования (фиг.11, фиг. 12, фиг.13) или для заданных координат на поверхности 39 поперечного сканирования (фиг.14, фиг. 15) дополнительно изменяют разность оптических длин плеч 6, 7 интерферометра 2 с постоянной скоростью V , изменяя тем самым, по заданному закону разность оптических длин
10 путей для низкокогерентного оптического излучения, направляемого на исследуемый объект 11, и низкокогерентного оптического излучения, направляемого по референтному пути.

С помощью светорасщепителя 5 смешивают оптическое излучение, вернувшееся от исследуемого объекта 11, и излучение, прошедшее по референтному
15 оптическому пути, в конкретной реализации, отраженное от референтного зеркала 9. При изменении разности оптических длин плеч 6, 7 с помощью устройства 10 происходит интерференционная модуляция интенсивности на частоте Доплера $f = 2V/\lambda$, где λ - рабочая длина волны источника 1, смешанного оптического излучения на выходе светорасщепителя 5, причем закон интерференционной модуляции
20 соответствует изменению интенсивности оптического излучения, вернувшегося от исследуемого объекта 11. Затем получают изображение исследуемого объекта 11 путем отображения интенсивности оптического излучения, вернувшегося от исследуемого объекта 11, используя для этого сигнал интерференционной модуляции интенсивности оптического излучения, являющегося результатом
25 указанного смещения, следующим образом.

Фотоприемник 3, в качестве которого может быть использован фотодиод, подключенный к интерферометру 2, обеспечивает преобразование смешанного оптического излучения с выхода светорасщепителя 5 в электрический сигнал. В конкретной реализации устройство для получения изображения объекта содержит
30 один фотоприемник, однако могут быть использованы любые другие известные схемы приема. Электрический сигнал поступает в блок 4 обработки и индикации,

включенный на выходе фотоприемника 3. Блок 4 предназначен для формирования изображения исследуемого объекта путем отображения интенсивности обратно рассеянного когерентного излучения и может быть выполнен, например, аналогично блоку обработки и индикации по ст. В.М.Геликонов и др. "Когерентная оптическая томография микронеоднородностей биотканей", Письма в ЖЭТФ, том. 61, вып.2, с. 149-153, который включает последовательно соединенные полосовой фильтр, логарифмический усилитель, амплитудный детектор, аналого-цифровой преобразователь и компьютер.

Полосовой фильтр блока 4 осуществляет выделение сигнала на частоте Доплера, что обеспечивает улучшение соотношения сигнал/шум. После усиления сигнал поступает на амплитудный детектор, который выделяет сигнал, пропорциональный огибающей этого сигнала. Выделенный амплитудным детектором блока 4 сигнал пропорционален сигналу интерференционной модуляции интенсивности смешанного оптического излучения. Аналого-цифровой преобразователь блока 4 осуществляет преобразование сигнала с выхода амплитудного детектора в цифровую форму. Компьютер блока 4 обеспечивает получение изображения путем отображения на дисплее интенсивности цифрового сигнала (указанное отображение может быть реализовано, например, по кн. Н.Е.Burdick. Digital imaging: Theory and Applications, 304 pp., Mc Graw Hill, 1997). Поскольку цифровой сигнал соответствует изменению интенсивности оптического излучения, вернувшегося от исследуемого объекта 11, то полученное на дисплее изображение соответствует изображению исследуемого объекта 11.

На фиг. 11, фиг. 12 и фиг. 13, иллюстрирующих построение изображения с помощью разработанных технических решений при плоской поверхности поперечного сканирования, показаны, соответственно, линии 36, 37, 38 в плоскости изображения, соответствующие геометрическому месту точек, до которых время распространения низкокогерентного оптического излучения, направляемого на исследуемый объект 11, и, следовательно, оптическая длина пути имеют неизменную величину при распространении низкокогерентного оптического излучения от соответствующих сопряженных точек на плоской поверхности 28 поперечного сканирования, разно удаленных от оптической оси устройства. Из рисунков видно, что при приблизительно конфокальном расположении первого 19 и

второго 20 линзовых компонент оптической системы 15 линии 36, 37, 38 не имеют кривизны. Причем это справедливо при размещении линзового компонента 19 на расстоянии, как приблизительно равном фокусному расстоянию $F1$ этого компонента от поверхности 28 (фиг. 11), так и на расстоянии $d1$ большем (фиг. 12), или на
5 расстоянии $d2$ меньшем (фиг. 13) фокусного расстояния $F1$, от поверхности 28. При этом в зависимости от местоположения первого линзового компонента 19 линии 37, 38 смещены в ту или иную сторону относительно местоположения линии 36 на некоторую величину $\delta 4$.

На фиг. 14, 15, иллюстрирующих построение изображения с помощью
10 разработанных технических решений при поверхности 39 поперечного сканирования, имеющей кривизну, показана линия 40 в плоскости изображения, соответствующая геометрическому месту точек, до которых время распространения низкокогерентного оптического излучения, направляемого на исследуемый
объект 11, и, следовательно, оптическая длина пути имеют неизменную величину
15 при распространении от соответствующих сопряженных точек на поверхности 39 поперечного сканирования, разнo удаленных от оптической оси устройства. Из рисунков видно, что линия 40 не имеет кривизны. При выполнении указанных выше условий взаимного расположения первого 19 и второго 20 линзовых компонент отсутствие кривизны указанной линии имеет место при размещении линзового
20 компонента 19 на расстоянии, как приблизительно равном фокусному расстоянию $F1$ этого компонента от поверхности 39, так и на расстоянии большем или меньшем фокусного расстояния $F1$, от поверхности 39.

Способ получения изображения объекта с помощью устройства, структурная схема которого приведена на фиг. 16, реализуется так же, как и с помощью
25 устройства по фиг. 1. Отличие заключается лишь в том, что изменение разности оптических длин путей для низкокогерентного оптического излучения, направляемого на исследуемый объект 11, и низкокогерентного оптического излучения, направляемого по референтному пути, осуществляют путем изменения оптической длины пути для низкокогерентного оптического излучения от
30 поверхности поперечного сканирования 28, т.е. от торцевой поверхности 17 дистальной части 18 оптического волокна 14, до оптической системы 15, т.е. до

исследуемого объекта 11. Для этого в устройстве по фиг. 16 устройство 10 для продольного сканирования исследуемого объекта 11 размещено внутри оптоволоконного зонда 8 и обеспечивает изменения оптической длины пути низкокогерентного оптического излучения от поверхности 28 поперечного сканирования до оптической системы 15. При этом оптоволоконный зонд 8 может быть реализован, например, по фиг. 17, где устройство 10 соединено с дистальной частью 18 оптического волокна 14. Другой пример реализации оптоволоконного зонда 8 показан на фиг. 18, где оптоволоконный зонд 8 дополнительно снабжен зеркалами 41, 42, при этом устройство 10 соединено с зеркалом 42. В реализации по 5 фиг. 17 указанное изменение разности оптических длин путей обеспечивается путем соответствующего перемещения дистальной части 18 оптического волокна 14 с помощью сканирующего устройства 10, а в реализации по фиг. 18 - путем соответствующего перемещения зеркала 42 с помощью сканирующего устройства 10. На фиг. 17, 18 показана линия 43 в плоскости изображения, соответствующая геометрическому месту точек, до которых время распространения 10 низкокогерентного оптического излучения, направляемого на исследуемый объект 11, и, следовательно, оптическая длина пути имеют неизменную величину при распространении от соответствующих сопряженных точек на поверхности 28 поперечного сканирования, разно удаленных от оптической оси устройства. Из 15 рисунка видно, что линия 43 не имеет кривизны. При этом пространственное положение линии 43, т.е. места фокусировки оптического излучения, совпадает с пространственным положением окна когерентности, причем совпадение указанных пространственных положений сохраняется при продольном сканировании объекта 11.

25 В реализациях, соответствующих фиг. 17, 18, при получении изображения подповерхностной части исследуемого объекта коэффициент M увеличения оптической системы 15 связан с показателем N_1 преломления исследуемого объекта 11 следующим образом: $M = 1/N_1$, а при получении изображения профиля исследуемого объекта коэффициент M увеличения оптической системы 15 связан с 30 показателем N_2 преломления среды, соприкасающейся с поверхностью исследуемого объекта 11, следующим образом: $M = 1/N_2$.

В реализациях, соответствующих фиг. 17, 18, торцевая поверхность 17

дистальной части 18 оптического волокна 14 может быть снабжена жестко скрепленной с ним микролинзой (на чертеже не показано).

На фиг. 20 приведен пример неискаженного изображения, полученного с помощью разработанных технических решений, где абберрация оптической длины
5 пути низкокогерентного оптического излучения, направляемого на исследуемый объект, скорректирована, в отличие от изображения, получаемого с помощью известных технических решений (фиг. 19).

Промышленная применимость

Изобретение может быть использовано в приборах для исследования
10 внутренней структуры объектов оптическими средствами, а именно, в низкокогерентных рефлектометрах и устройствах для оптической когерентной томографии, применяемых, в частности, в медицинской диагностике состояния отдельных органов и систем человека *in vivo* или *in vitro*, а также в технической диагностике, например, для контроля технологических процессов. Следует отметить,
15 что изобретение может быть реализовано с помощью стандартных средств.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ получения изображения объекта, по которому низкокогерентное оптическое излучение направляют одновременно на исследуемый объект и по референтному оптическому пути, при этом упомянутое оптическое излучение направляют на исследуемый объект через оптическую систему, которая обеспечивает фокусировку низкокогерентного оптического излучения на исследуемом объекте, при одновременном поперечном сканировании упомянутого оптического излучения по поверхности, приблизительно ортогональной направлению распространения упомянутого оптического излучения, затем смешивают оптическое излучение, вернувшееся от исследуемого объекта, и оптическое излучение, прошедшее по референтному оптическому пути, и отображают интенсивность оптического излучения, вернувшегося от исследуемого объекта, используя для этого оптическое излучение, являющееся результатом указанного смещения, ОТЛИЧАЮЩИЙСЯ тем, что корректируют связанную с поперечным сканированием абберацию оптической длины пути низкокогерентного оптического излучения, направляемого на исследуемый объект, путем обеспечения постоянства времени распространения низкокогерентного оптического излучения от заданной точки на поверхности поперечного сканирования до соответствующей сопряженной точки в плоскости изображения в пределах поля зрения.

2. Способ получения изображения объекта по п. 1, ОТЛИЧАЮЩИЙСЯ тем, что для заданных координат на поверхности поперечного сканирования дополнительно осуществляют продольное сканирование, изменяя по заданному закону разность оптических длин путей для низкокогерентного оптического излучения, направляемого на исследуемый объект, и низкокогерентного оптического излучения, направляемого по референтному пути.

3. Способ получения изображения объекта по п. 2, ОТЛИЧАЮЩИЙСЯ тем, что разность оптических длин путей для низкокогерентного оптического излучения, направляемого на исследуемый объект, и низкокогерентного оптического излучения, направляемого по референтному пути, изменяют, по меньшей мере, на несколько десятков длин волн низкокогерентного оптического излучения.

4. Способ получения изображения объекта по п. 2 или по п. 3,

ОТЛИЧАЮЩИЙСЯ тем, что изменение разности оптических длин путей для низкокогерентного оптического излучения, направляемого на исследуемый объект, и низкокогерентного оптического излучения, направляемого по референтному пути, осуществляют путем изменения оптической длины пути для низкокогерентного оптического излучения от поверхности поперечного сканирования до оптической системы.

5. Способ получения изображения объекта по п. 1 или по п. 2, или по п. 3 или по п. 4, ОТЛИЧАЮЩИЙСЯ тем, что исследуемым объектом является биоткань живого организма.

10 6. Способ получения изображения объекта по п. 5, ОТЛИЧАЮЩИЙСЯ тем, что исследуемым объектом является внутренняя полость живого организма.

7. Способ получения изображения объекта по п. 1 или по п. 2, или по п. 3, или по п. 4, или по п. 5, или по п. 6, ОТЛИЧАЮЩИЙСЯ тем, что в качестве упомянутого низкокогерентного оптического излучения используют оптическое излучение видимого или ближнего ИК диапазона длин волн.

15 8. Устройство для получения изображения объекта, содержащее оптически связанные источник низкокогерентного оптического излучения, интерферометр, и, по меньшей мере, один фотоприемник, выход которого связан с блоком обработки и индикации, при этом интерферометр включает оптически связанные светорасщепитель, измерительное и референтное плечи, а измерительное плечо снабжено устройством доставки низкокогерентного оптического излучения, содержащим оптически связанные оптическое волокно, размещенное с возможностью прохождения через него низкокогерентного оптического излучения от проксимального конца упомянутого устройства доставки к его дистальному концу, и оптическую систему, которая обеспечивает фокусировку низкокогерентного оптического излучения на исследуемом объекте и включает, по меньшей мере, первый линзовый компонент с положительной оптической силой, а также систему поперечного сканирования низкокогерентного оптического излучения, при этом оптическое волокно входит в состав упомянутой системы поперечного сканирования, которая выполнена с возможностью перемещения торцевой поверхности дистальной части оптического волокна по поверхности поперечного сканирования в направлении, приблизительно перпендикулярном оси оптического

20

25

30

волокну, ОТЛИЧАЮЩЕЕСЯ тем, что устройство доставки низкокогерентного оптического излучения выполнено с возможностью коррекции связанной с поперечным сканированием абберации оптической длины измерительного плеча, при этом упомянутая оптическая система содержит, по меньшей мере, второй
5 линзовый компонент с положительной оптической силой, установленный за упомянутым первым линзовым компонентом.

9. Устройство для получения изображения объекта по п. 8, ОТЛИЧАЮЩЕЕСЯ тем, что поверхность поперечного сканирования характеризуется отличной от нуля кривизной.

10 10. Устройство для получения изображения объекта по п. 9, ОТЛИЧАЮЩЕЕСЯ тем, что упомянутое оптическое волокно выполняет функцию упругой консоли и закреплено в опорном элементе, входящем в состав устройства доставки низкокогерентного оптического излучения.

11. Устройство для получения изображения объекта по п. 8 или по п. 9, или
15 по п. 10, ОТЛИЧАЮЩЕЕСЯ тем, что первый и второй линзовые компоненты оптической системы размещены приблизительно конфокально.

12. Устройство для получения изображения по п. 9 или по п. 10, ОТЛИЧАЮЩЕЕСЯ тем, что первый линзовый компонент оптической системы размещен на расстоянии, приблизительно равном фокусному расстоянию этого
20 линзового компонента, от поверхности поперечного сканирования, а расстояние между первым и вторым линзовыми компонентами оптической системы отличается от расстояния, соответствующего конфокальному расположению упомянутых линзовых компонент оптической системы на величину $\delta 1$, связанную с фокусным расстоянием $F1$ первого линзового компонента оптической системы и радиусом R
25 кривизны поверхности поперечного сканирования соотношением:

$$\delta 1 \cong (F1)^2 / R.$$

13. Устройство для получения изображения по п. 9 или по п. 10, ОТЛИЧАЮЩЕЕСЯ тем, что первый линзовый компонент оптической системы смещен на расстояние $\delta 2$ от положения, при котором расстояние от этого линзового
30 компонента до поверхности поперечного сканирования приблизительно равно фокусному расстоянию $F1$ этого линзового компонента, а расстояние между первым

и вторым линзовыми компонентами оптической системы отличается от расстояния, соответствующего конфокальному расположению упомянутых линзовых компонент оптической системы на величину $\delta 3$, определяемую соотношением:

$$\delta 3 \cong (F1)^2 / (R + \delta 2).$$

5 14. Устройство для получения изображения объекта по п. 8 или по п. 9, или по п. 10, или по п. 11, или по п. 12, или по п. 13, ОТЛИЧАЮЩЕЕСЯ тем, что устройство доставки низкокогерентного оптического излучения выполнено в виде оптоволоконного зонда.

10 15. Устройство для получения изображения объекта по п. 8 или по п. 9, или по п. 10, или по п. 11, или по п. 12, или по п. 13, или по п. 14, ОТЛИЧАЮЩЕЕСЯ тем, что, по меньшей мере, одно из плеч интерферометра дополнительно снабжено устройством для продольного сканирования.

15 16. Устройство для получения изображения объекта по п. 15, ОТЛИЧАЮЩЕЕСЯ тем, что устройство для продольного сканирования размещено в измерительном плече интерферометра и выполнено обеспечивающим изменение оптической длины участка измерительного плеча от поверхности поперечного сканирования до оптической системы.

20 17. Устройство для получения изображения объекта по п. 16, ОТЛИЧАЮЩЕЕСЯ тем, что при получении изображения подповерхностной части исследуемого объекта коэффициент M увеличения оптической системы связан с показателем $N1$ преломления исследуемого объекта следующим образом: $M = 1 / N1$.

25 18. Устройство для получения изображения объекта по п. 16, ОТЛИЧАЮЩЕЕСЯ тем, что при получении изображения профиля исследуемого объекта коэффициент M увеличения оптической системы связан с показателем $N2$ преломления среды, соприкасающейся с поверхностью исследуемого объекта, следующим образом: $M = 1 / N2$.

30 19. Устройство для получения изображения объекта по п. 15 или по п. 16, или по п. 17, или по п. 18, ОТЛИЧАЮЩЕЕСЯ тем, что устройство для продольного сканирования размещено внутри устройства доставки низкокогерентного оптического излучения.

20. Устройство для получения изображения объекта по п. 16 или по п. 17, или

по п. 18, или по п. 19, ОТЛИЧАЮЩЕЕСЯ тем, что торцевая поверхность оптического волокна снабжена жестко скрепленной с ним микролинзой.

21. Устройство доставки низкокогерентного оптического излучения, содержащее оптически связанные оптическое волокно, размещенное с
5 возможностью прохождения через него низкокогерентного оптического излучения от проксимального конца устройства доставки к его дистальному концу, и оптическую систему, которая обеспечивает фокусировку низкокогерентного оптического излучения на исследуемом объекте и включает, по меньшей мере, первый линзовый компонент с положительной оптической силой, а также систему
10 поперечного сканирования низкокогерентного оптического излучения, при этом оптическое волокно входит в состав упомянутой системы поперечного сканирования, которая выполнена с возможностью перемещения торцевой поверхности дистальной части оптического волокна по поверхности поперечного сканирования в направлении, приблизительно перпендикулярном оси оптического
15 волокна, ОТЛИЧАЮЩЕЕСЯ тем, что упомянутая оптическая система выполнена с возможностью коррекции связанной с поперечным сканированием аберрации оптической длины пути низкокогерентного оптического излучения, проходящего через устройство доставки, при этом оптическая система содержит, по меньшей мере, второй линзовый компонент с положительной оптической силой, который
20 установлен за упомянутым первым линзовым компонентом.

22. Устройство доставки низкокогерентного оптического излучения по п. 21, ОТЛИЧАЮЩЕЕСЯ тем, что поверхность поперечного сканирования характеризуется отличной от нуля кривизной.

23. Устройство доставки низкокогерентного оптического излучения по п. 22,
25 ОТЛИЧАЮЩЕЕСЯ тем, что упомянутое оптическое волокно выполняет функцию упругой консоли и закреплено в опорном элементе, входящем в состав устройства доставки низкокогерентного оптического излучения.

24. Устройство доставки низкокогерентного оптического излучения по п. 21 или по п. 22, или по п. 23, ОТЛИЧАЮЩЕЕСЯ тем, что первый и второй линзовые
30 компоненты оптической системы размещены приблизительно конфокально.

25. Устройство доставки низкокогерентного оптического излучения по п. 22 или по п. 23, ОТЛИЧАЮЩЕЕСЯ тем, что первый линзовый компонент оптической

системы размещен на расстоянии, приблизительно равном фокусному расстоянию этого линзового компонента, от поверхности поперечного сканирования, а расстояние между первым и вторым линзовыми компонентами оптической системы отличается от расстояния, соответствующего конфокальному расположению
5 упомянутых линзовых компонент оптической системы на величину $\delta 1$, связанную с фокусным расстоянием $F1$ первого линзового компонента оптической системы и радиусом R кривизны поверхности поперечного сканирования соотношением:

$$\delta 1 \cong (F1)^2 / R.$$

26. Устройство доставки низкокогерентного оптического излучения по п. 22
10 или по п. 23, ОТЛИЧАЮЩЕЕСЯ тем, что первый линзовый компонент оптической системы смещен на расстояние $\delta 2$ от положения, при котором расстояние от этого линзового компонента до поверхности поперечного сканирования приблизительно равно фокусному расстоянию $F1$ этого линзового компонента, а расстояние между первым и вторым линзовыми компонентами оптической системы отличается от
15 расстояния, соответствующего конфокальному расположению упомянутых линзовых компонент оптической системы на величину $\delta 3$, определяемую соотношением:

$$\delta 3 \cong (F1)^2 / (R + \delta 2) .$$

27. Устройство доставки низкокогерентного оптического излучения по п. 21
или по п. 22, или по п. 23, или по п. 24, или по п. 25, или по п. 26,
20 ОТЛИЧАЮЩЕЕСЯ тем, что устройство доставки низкокогерентного оптического излучения выполнено в виде оптоволоконного зонда, при этом оптическое волокно, оптическая система и система поперечного сканирования низкокогерентного оптического излучения размещены в протяженном корпусе, снабженном продольным сквозным отверстием, в котором в продольном направлении размещено
25 упомянутое оптическое волокно.

28. Устройство доставки низкокогерентного оптического излучения по п. 21
или по п. 22, или по п. 23, или по п. 24, или по п. 25, или по п. 26, или по п. 27,
ОТЛИЧАЮЩЕЕСЯ тем, что вблизи плоскости изображения торцевой поверхности
дистальной части оптического волокна размещено выходное окно устройства
30 доставки низкокогерентного оптического излучения.

29. Устройство доставки низкокогерентного оптического излучения по п. 28,

ОТЛИЧАЮЩЕЕСЯ тем, что функцию выходного окна устройства доставки низкокогерентного оптического излучения выполняет второй линзовый компонент оптической системы.

30. Устройство доставки низкокогерентного оптического излучения по п. 28 или по п. 29, ОТЛИЧАЮЩЕЕСЯ тем, что нормаль к наружной поверхности выходного окна устройства доставки низкокогерентного оптического излучения ориентирована под углом к направлению падения низкокогерентного оптического излучения на упомянутую наружную поверхность, превышающим угол расходимости упомянутого низкокогерентного оптического излучения в месте его пересечения с упомянутой наружной поверхностью.

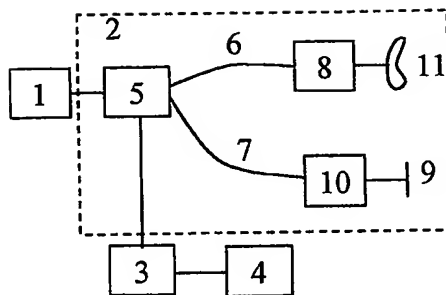
31. Устройство доставки низкокогерентного оптического излучения по п. 30, ОТЛИЧАЮЩЕЕСЯ тем, что при однокоординатной приближенно линейной траектории поперечного сканирования второй линзовый компонент смещен в направлении, ортогональном направлению поперечного сканирования, и в направлении, ортогональном направлению распространения низкокогерентного оптического излучения.

32. Устройство доставки низкокогерентного оптического излучения по п. 21 или по п. 22, или по п. 23, или по п. 24, или по п. 25, или по п. 26, или по п. 27, по 28 или по п. 29, или по п. 30, или по п. 31, ОТЛИЧАЮЩЕЕСЯ тем, что оно дополнительно снабжено устройством для продольного сканирования, выполненным в виде устройства для изменения оптической длины пути низкокогерентного оптического излучения от поверхности поперечного сканирования до оптической системы.

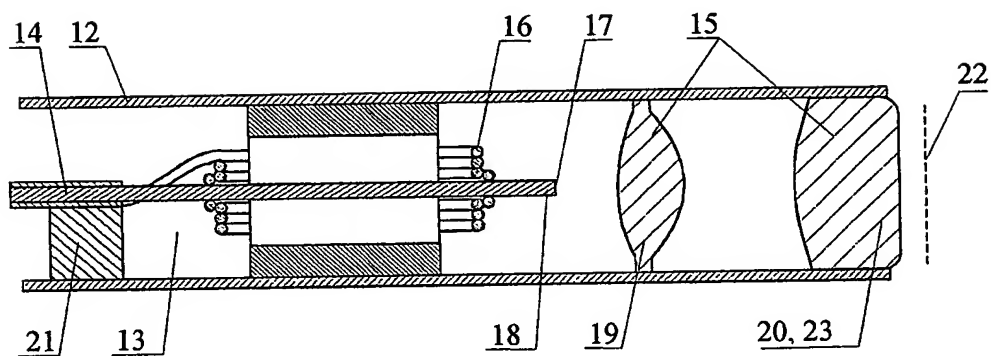
33. Устройство для получения изображения объекта по п. 32, ОТЛИЧАЮЩЕЕСЯ тем, что при получении изображения подповерхностной части исследуемого объекта коэффициент M увеличения оптической системы связан с показателем $N1$ преломления исследуемого объекта следующим образом: $M = 1/N1$.

34. Устройство для получения изображения объекта по п. 32, ОТЛИЧАЮЩЕЕСЯ тем, что при получении изображения профиля исследуемого объекта коэффициент M увеличения оптической системы связан с показателем $N2$ преломления среды, соприкасающейся с поверхностью исследуемого объекта, следующим образом: $M = 1/N2$.

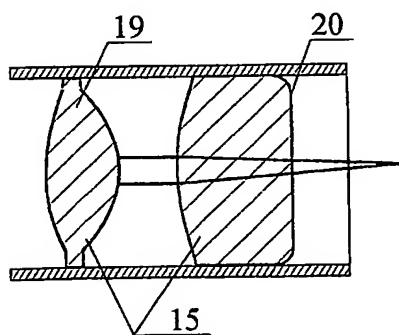
35. Устройство доставки низкокогерентного оптического излучения по п. 21 или по п. 22, или по п. 23, или по п. 24, или по п. 25, или по п. 26, или по п. 27, по 28 или по п. 29, или по п. 30, или по п. 31, или по п. 32, или по п. 33, или по п. 34, ОТЛИЧАЮЩЕЕСЯ тем, что торцевая поверхность оптического волокна снабжена
5 жестко скрепленной с ним микролинзой.



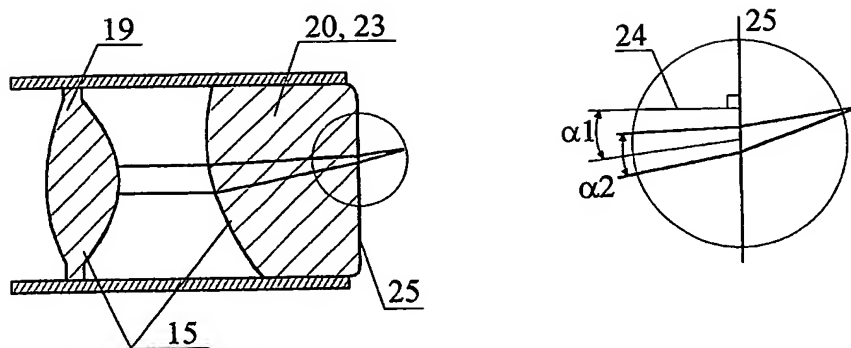
Фиг. 1



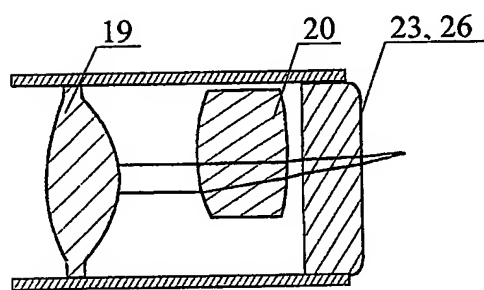
Фиг. 2



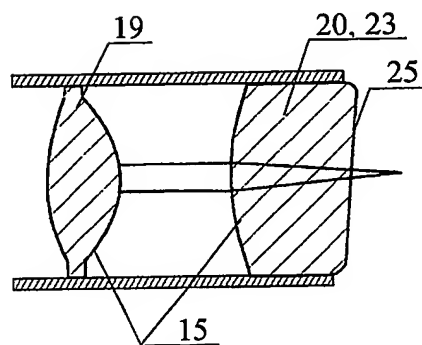
Фиг. 3



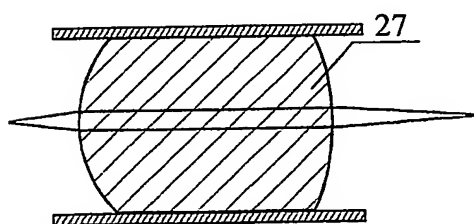
Фиг. 4



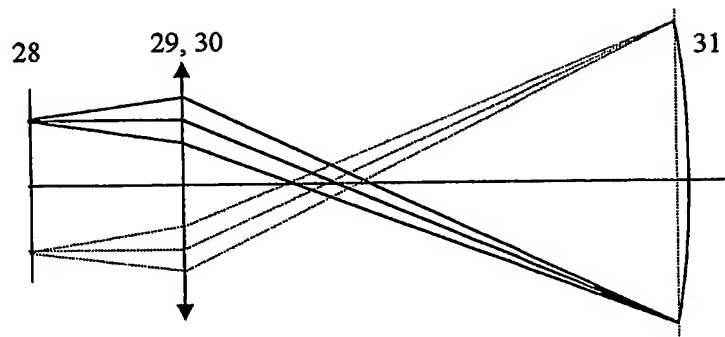
Фиг. 5



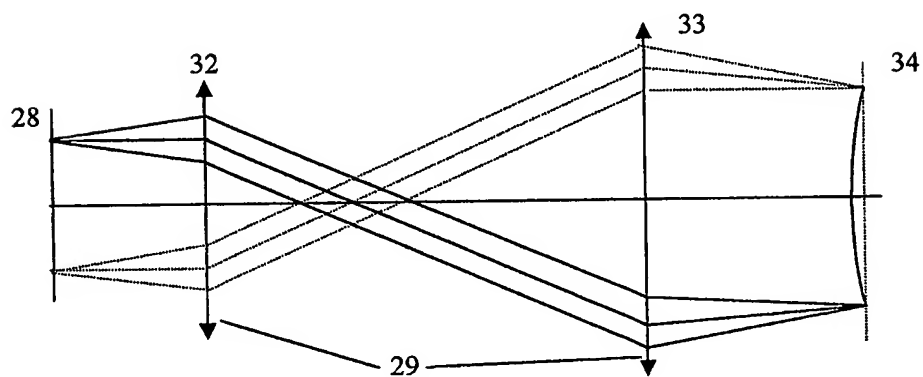
Фиг. 6



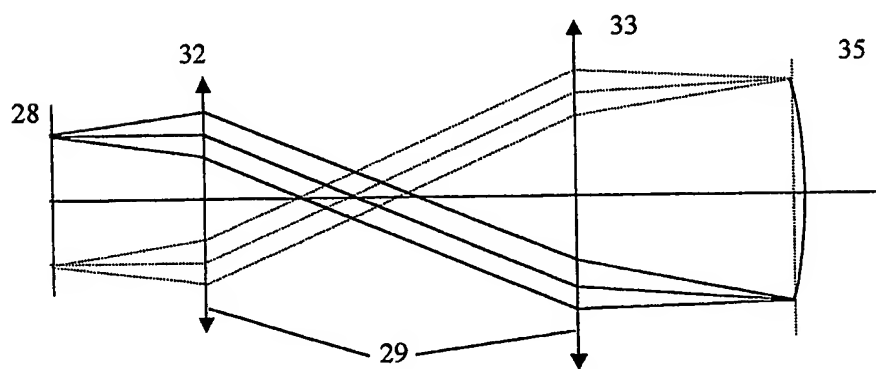
Фиг. 7



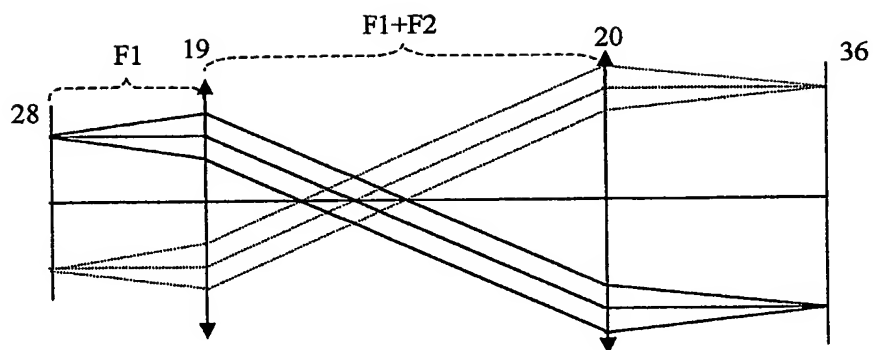
Фиг. 8



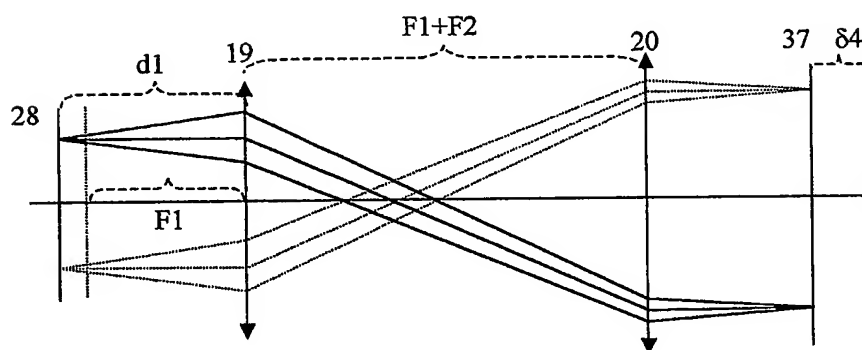
Фиг. 9



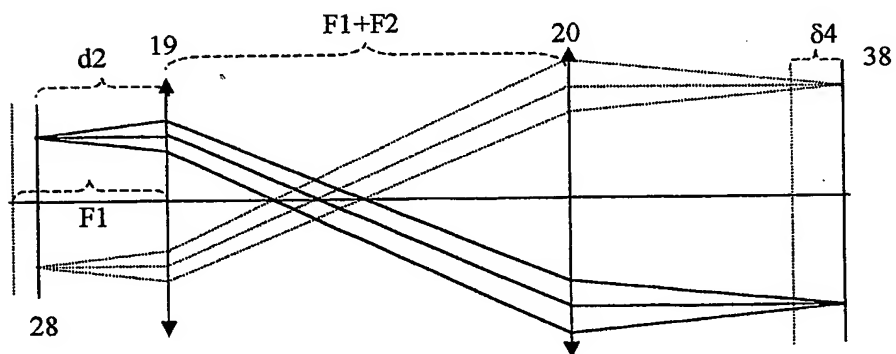
Фиг. 10



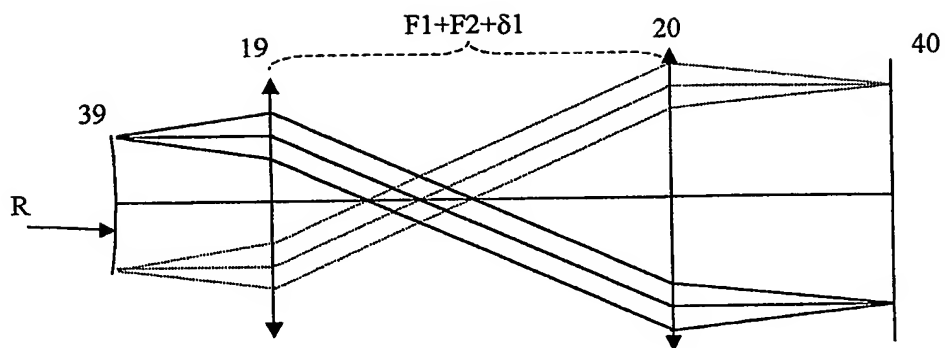
Фиг. 11



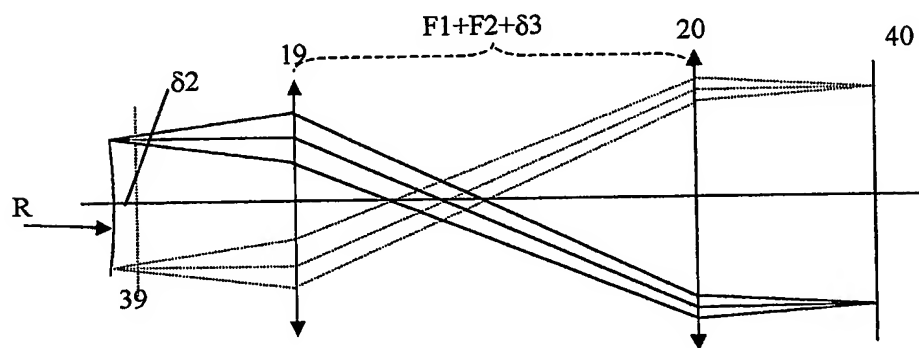
Фиг. 12



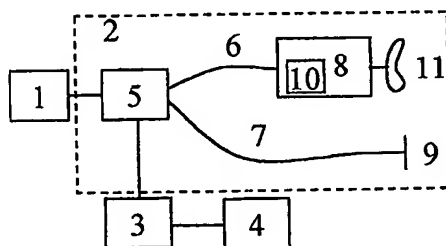
Фиг. 13



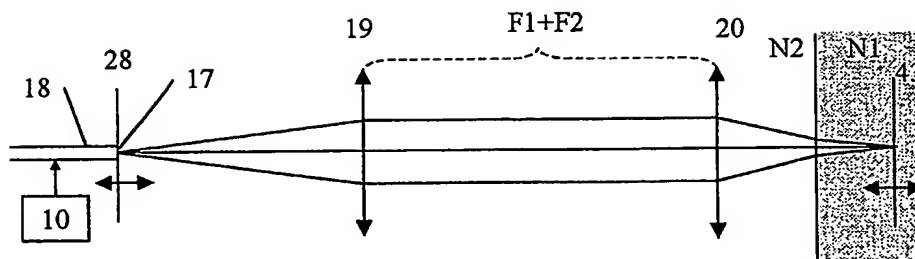
Фиг. 14



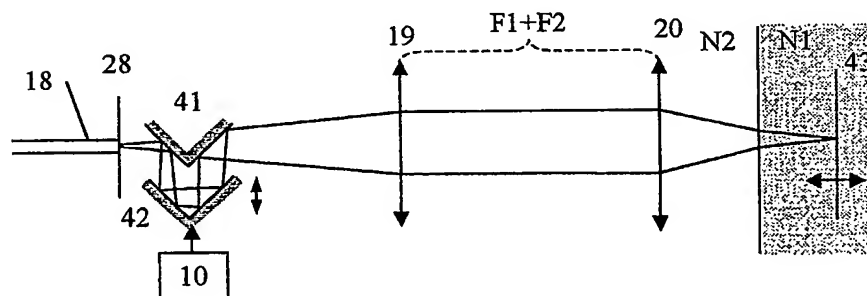
Фиг. 15



Фиг. 16



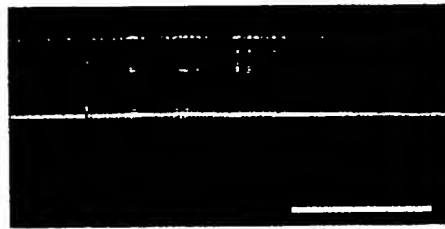
Фиг. 17



Фиг. 18



Фиг. 19



Фиг. 20